

氷掘削技術の展望

鈴木 義 男*

Outlook of Ice Excavation Techniques

Yosio SUZUKI*

Abstract: In earth boring it is common to circulate drilling mud in the bored hole. The two purposes of the circulation, besides removal of cuttings, are to cool cutters and to preserve the hole, which are both unimportant in ice boring. Hence, because of its light weight, a cable-suspended core drill which treats cuttings locally is preferred to a drill using the mud circulation which needs heavy equipments. The drilling time with a core drill is discussed in detail. An important problem in deep ice boring is the hole closure due to ice pressure. Technique to fill the hole with liquid to cope with the hole closure is introduced. Then, various kinds of ice drills are introduced and assessed. Included are: auger drills, rotary machines, turbo drills, dyna drills, cable-suspended electromechanical and electrothermal drills, steam drills, hot-water drills and flame-jet drills. Tunnel and trench excavations carried out in Greenland are briefly introduced at the end.

要旨: 地盤掘削では、孔内に泥水を循環させて切粉処理する方式が主流である。泥水循環は、孔壁保守と切削具の冷却を目的とするが、これらは氷掘削では不要である。それで、氷掘削では、装置が大規模な泥水の孔内循環に代わり、切粉を孔底のドリル内で処理するケーブルつり下げ方式のコアドリルが主流となった。この場合の掘削所要時間をきめる諸要素について、現在の標準値を紹介する。さらに、深いボーリングで問題となる孔径収縮対策の液封について説明した後、他方式を含め、これまで実用化された氷掘削機の具体的説明と評価を行う。最後に、トンネルおよびトレンチの掘削について、グリーンランドでの実行例を紹介する。

1. 序 言

極地活動で重要な作業である氷掘削は地盤掘削の一種であるが、機材の輸送が困難であり、また非専門家により行われることが多いので、一般の地盤掘削機に比べて軽く、取り扱いが簡単な専用機の開発が望まれる。幸い、氷は地盤に比べ掘削しやすいので、このような掘削機の開発が可能である。本論文では、専用機の開発の進んだ氷掘削技術をおもに考察し、トレンチ、トンネルなどの掘削については実施例を紹介するにとどめる。

* 北海道大学低温科学研究所。 The Institute of Low Temperature Science, Hokkaido University, Kita-19, Nishi-8, Kita-ku, Sapporo 060.

2. 氷掘削の特徴

2.1. 掘削方式

固体を粉体や液体などのように動かしやすい形に変える操作を「切削」、生成物を「切粉」と仮称する。掘削の基本は、切削し切粉を処理することである。地盤掘削では、ふつう機械切削で、切粉は孔内に流体（掘削流体）を循環させ、これに載せて孔外に排出する方式を用いる。この流体連続処理方式を用いる理由は、切粉による地層判別が速やかに行われ、また切削具の冷却がよいことであるが、氷ではこのいずれも不要である。それで、氷掘削では、装置が大規模でまた大量の不凍流体の必要なこの方式は現在用いられず、切削具に設けた切粉収納部に切粉を収容し、一定長掘進ごとに切削具を地上に引き上げて切粉を回収する間欠処理方式が主流である。この場合、切削具の走向速度を高めるため、切削具にモーターをつけた（孔底型）電気ドリル、もしくは電気ヒーターで熱切削を行う電熱ドリルを、ウインチに巻いた電力ケーブルでつるす方式をとるが、ごく浅い掘削では、切削具を地表より駆動することもある。

掘削には、全面を切削する全断面掘削と、孔壁の環状部だけ切削し中心部（コア）は固体のまま取り出すコアリングとがある。後者では、一定長ごとに切削を中断しコアを回収するので掘削所要時間が長くなるが、間欠処理の時は、切粉とコアを同時に回収すればコア回収による時間的損失はない。それで、切削具を環状とし、切粉収納部に加えコア収納部をも持つコアドリルを用いコアリングを行うことが多い。

氷の熱切削では、切粉（融水）を孔外に排出しなくてよいこともある。この時は掘削時間を短くするため全断面掘削がよく用いられ、これには電熱ドリルのほか、スチームドリル、熱水ドリル、火炎ドリルが使われる。

2.2. 掘削所要時間

間欠処理では掘削は一定長 L の掘進作業の繰り返しであるから、深さ D までの掘削所要時間 $T(D)$ は、作業回数と平均作業時間の積で与えられる。

$$T(D) = \frac{D}{L} \left(\frac{L}{v} + s + \frac{D}{V} \right) = D \left(\frac{1}{v} + \frac{s}{L} + \frac{D}{LV} \right) \dots\dots\dots(1)$$

ここで、 v は切削具の進入速度、 s は準備時間、 V は切削具走向速度である。全断面掘削でも、切削具保守のため一定長掘進ごとに切削具を地表に引き上げるので、切粉処理に独立の時間を使わない時は上式が適用できるが、 L の値は 100 m 以上である。 D が L より小さい時は上式で L を D とおけばよい。

コアリングの L は数 m 以下で、 $T(D)$ は一般に D の 2 次式である。よって、目標深 D の深い大型掘削機では、 L と V を大きくとり、 $T(D)$ があまり長くないようにする。ケー

ブルつり下げ方式では 1 m/s 以上の V も容易に得られるが、所要動力や重量との兼ね合いもあるので、ふつう、小型機 (100 m 以浅用) で 0.5 m/s 以下、中型機 (1 000 m 以浅用) で 1 m/s 以下、大型機 (1 000 m 以深用) でも 2 m/s 以下とする。 L は小型機で、0.5–1 m、中型機で 1–2 m、大型機で 2–6 m である。 s は小型で 10^2 s、大型でも 2×10^2 s ぐらいに押さえる。

これらの値により、上式の S/L 値と目標深 D に対する $D/(LV)$ 値はいずれも $2-4 \times 10^3$ s/m 程度となる。

2.3. 比切削エネルギー (MELLOR and SELLMAN, 1976)

進入速度 v は次式をみたす。

$$P/A = E_s \cdot v \quad \dots\dots\dots(2)$$

ここで、 P は切削具出力、 A は孔軸に垂直の切削断面積、 E_s は単位体積を切削するに要したエネルギーで、比切削エネルギーという。 E_s が小さいほど切削具の効率はよく、また被切削物は切削しやすいといえる。

氷の熱切削では E_s は 3×10^8 Pa (融解熱) 以下にはならない。熱損失はさけられないから、実用値は融点の氷に対し 5×10^8 Pa ぐらいである。電熱ヒーターでは現在、出力密度 P/A を 10^6 W/m² 以上にするのは難しく、電熱ドリルの v で 2×10^{-3} m/s (7.2 m/h) を超えたものはない。氷が低温であれば E_s は大きく (v は遅く) なり、またフィルムでは E_s は密度に比例するので氷より小さく (v は速く) なる。スチームドリル、熱水ドリル、火炎ドリルではずっと大きな出力密度がとれる。

機械切削には、切削具が孔軸方向に上下する衝撃法と、孔軸まわりを回転する回転法がある。前者は氷では効率が悪い。氷では、回転法で鋭い平刃 (刃角 30–35°) を大きなすくい角 (35–45°)、1–5 mm の切り込み深さ、0.2–1 m/s の線速度で用いると 10^6 Pa ぐらいの低い E_s 値が得られる。上記の切り込み深さは、 10^4 N/m 程度の刃先荷重で得られる。刃先荷重、 E_s 値とも地盤ボーリングの時より 1–3 桁低い。出力密度は刃数に比例して増やせるが、刃数には限りがあり、また刃 1 枚あたりの出力密度は刃の強度できまるので、当然 v にも上限がある。コアドリルでは v^{-1} は S/L と $D/(LV)$ の和よりあまり小さくする必要はないので、 v を 10^{-2} m/s (36 m/h) ぐらいにとるが、この程度の進入速度には焼き入れ鋼製の刃で十分である。軟岩用の鈍い平刃は効率が悪い。ローラービットは氷に使われたことはない。ダイヤモンドビットは目詰まりし氷には無効である。

2.4. 孔壁保守

前述のように、地盤掘削では一般に切粉を流体で処理する。この流体には泥水を用いるのが普通だが、その理由の一つは、孔内を満たす泥水により孔壁の崩壊を防止することにある。氷では孔壁崩壊の危険は少ないので、切粉処理に液体を用いる必要はない。しかし、深さが増し、氷圧による孔の収縮が速まると、コアドリルの上下に際し孔の拡幅が必要となり、や

がては拡幅に追われ掘進不能となる。収縮対策を行っていない孔での掘削限度は、氷温と氷圧のほか、掘削機の特性にもよるので一般的には論じられないが、極地氷床で 500–1000 m (第25次日本南極地域観測隊はみずほ基地で 700 m, フランス隊は 1977–78年にドーム C で 905 m をいずれも電熱ドリルで掘った), 棚氷のように氷温が高いときは 200–300 m と考えてよい (特定ドリルについての考察例は JOHNSEN *et al.*, 1980, 収縮の実測例は Gow, 1963 を参照)。

掘削限度を超えて掘削を行う時、また浅くても長期間孔径を維持したい時は孔の収縮対策が必要である。氷ではケーシングによった例はなく、不凍液を孔内に満たし孔壁にかかる実効圧を減少する方法が使われてきた。この時、透液性のフィルム層はケーシングを行う (RAND, 1980b)。フィルム層の孔壁を氷化するか、フィルム層以深だけ液封してもよい。

不凍液には、アルコール (ZOTIKOV, 1979) やエチレングリコール (UEDA and GARFIELD, 1968) など水溶性のものも、軽油や灯油など非水溶性のものも使われる。前者は、濃度が適当でないと孔径変化をもたらす。後者には、密度を増すため、トリクロロエチレン (UEDA and GARFIELD, 1968), テトラクロロエチレン (GUNDSTRUP and JOHNSEN, 1982), フレオン 11 (GILLET *et al.*, 1982) などを混ぜる。

3. 掘削機の詳細

3.1. 衝撃ドリル

重い切削具をワイヤで上下させ、孔底を連続打撃して破碎し、切粉はピストン式回収具で回収する。全断面用切粉間欠処理ドリルで氷にも使われたが効率は悪い (HARRISON and KAMB, 1976)。氷河氷間の黒氷 (土砂を含んだ氷) の薄層を突破するのに補助的に用いるのがよい。

3.2. オーガードリル

この方式で代表的なコアドリルは、SIPRE オーガーである。これは SIPRE (Snow, Ice and Permafrost Research Establishment, CRREL の前身の米陸軍寒地工学研究so) が1949年頃から開発し1955年には商品化した。ドリル本体は、外側に2本のオーガー (らせんひれ) を溶接した長さ 90 cm, 内径約 8 cm のパイプで、下端に2枚の平刃、上端にはハンドルが取り付けられる。深さが増せば、ハンドルとドリル間に長さ 1 m のドリルロッドを順次付け加える。切粉はオーガーにより上方に運ばれ、ドリル上部の開口部よりドリル内に入る。コア採取長は 50 cm 以下である (最初の1回は 90 cm とれる)。刃は以後の標準となったもので、コア径 75 mm, 孔径 111 mm で、 -30°C の氷に対し 27 m/h の進入速度を得た (UEDA *et al.*, 1975)。人力を 80 W とすれば、 E_s は $2 \times 10^6 \text{ Pa}$ となる。

タングステンカーバイドのチップをつけた刃を使えば、永久凍土、黒氷にも使えるが、 E_s

は 10^7 Pa 以上となるので、ふつうモーターまたはガソリンエンジンで駆動する。

標準型は 6 m 用（ドリルロッド 5 本）だが、適当なつり上げ具と併用して 55 m 掘った例もある (RAGLE *et al.*, 1964)。しかし、このドリルは引き上げ時に、ドリルと孔壁間に残った切粉をとり落としやすく、また、ドリルと孔壁間に切粉がつまり抑留される危険も多いので、数 m 以深の掘削には小形電気ドリルを用いるのがよい。

ドリルはステンレス製で約 8 kg、ロッドは厚肉アルミ管（接続部はステンレス）で 1 本 2.5 kg であるが、最近では軽量化が試みられ、ネブラスカ大学では FRP を用い、ドリル（1.5 m 長）3 kg、ロッド（2 m 長）1.5 kg のもの (KOCI, 1982a) を、また、筆者もドリル（アルミ 1.2 m 長）2 kg、ロッド（FRP 製、1.2 m 長）0.5 kg のものを作った。

全断面ボーリング用のオーガーは、氷下の魚釣り用に、孔径 5–20 cm のものが市販されている。注意すべきは、氷オーガーでは中心部の 1–3 cm 径は切削せず、コアは数 cm ごとに折れて切粉とともに排出するようにしてあることで、これによりわずかな推力で効率よい切削ができる。アースオーガーにみられるシャフトのやり状の突き出し部は、氷では有害無益である。

これらの市販アイスオーガーは、1 m 以下の掘削用が多いが、シャフトを追加できるようにすれば、数 m 厚までの海水の貫通孔掘削に便利であるが、大径の貫通孔掘削はコアドリルによるのがよい。筆者は、孔径 340 mm、コア径 300 mm、バレル長さ 700 mm の海水用大型コアドリルを 1975 年に作った。これは第 17 次観測隊で 2 m 以上の海水の貫通孔掘削に有効に利用された。駆動には 400 W モーターを用い、ドリル回転数は 50 rpm である。コアは、ドリル引き上げ後にくさびを打ち込むことで容易に下端で破断でき、引き上げには専用つり具を用いた。

3.3. ロータリー掘削機

地盤掘削の標準方式で、切削具をドリルパイプ列により地表で駆動する。このパイプ列は同時に掘削流体（ふつう泥水を使う）の流路となる。全断面、コア両用で、コアドリルは外管回転、内管静止形が標準で、そのすき間が流路となる。

ロータリー機は、1955–59 年の間グリーンランド、南極バード基地、ロス棚氷で、CRREL (Cold Regions Research and Engineering Laboratory) により使われ、バード基地では、300 m までのコアボーリングとそれより深い 411 m までの全断面ボーリング（数カ所でコア採取）に成功した。掘削流体は高圧空気を用い、ロス棚氷では一部軽油も試用した。使用機は 55 馬力の 450 m 用で、コンプレッサー ($0.15 \text{ m}^3/\text{s}$, $9 \times 10^5 \text{ Pa}$) 2 台と空気冷却装置を加えた機材重量は 26 t に達した。コアドリル用切削具（ビット）は数種類用意したが 8–12 枚の平刃をもち、すくい角は 0° または負で軟鋼製で刃先角は鈍い。コア径 97 mm、孔径 146 mm で進入速度 v は 9 m/h 程度であった (LANGE, 1973)。軟岩用に似た刃は刃先荷重を小さくす

ることが難しいと考えて用いたと思われるが効率は悪い。地表入力を 30 kW, 孔底出力を 2 %の 600 W と仮定すると, 上記のデータから E_s は SIPRE オーガーの10倍以上の 2.6×10^7 Pa となる。

この方式では, ドリルパイプ 1 本の長さを l , 脱着時間を t とすると, V は l/t を超えない。上記の掘削では l は 6 m で, t は 2×10^3 s ぐらいであろう。LANGE はパイプ長と採取コア長をいずれも 20 m とすれば, 3 000 m のコアドリリングも時間的には可能であるが ($L=20$ m, $v=10$ m/h, $s=0.5$ h. $V=300$ m/h とすれば $T(3\,000\text{ m})$ は 1 875 時間となる), 機械重量は 150 t を超え, 設営面から実行は難しいとした。

1970年代に, ワイヤライン法 (太いドリルパイプを用い, コアドリル内管をケーブルで引き上げ, コアを回収する) により V を高速化 (3 000 m/h 以上) し, また, 軽量ドリルパイプにより装置全体を軽量化することが提案され, 内径 84.6 mm の FRP 製パイプ (長さ 6 m, 2.87 kg/m) 75本が作られた (HANSEN, 1976)。このパイプは1976年ロス棚氷の全断面掘削に試用されたが, 280 m で抑留され棚氷の貫通に失敗, 以後の開発は中止された。しかし, HANSEN はなおこのワイヤライン法 (掘削流体は軽油) は液封孔内掘削には適していると考えている (HANSEN, 1982)。

3.4. ターボドリルとダイナドリル

これらは, 掘削流体の運動エネルギーを孔底で回転力に変える方式でロータリー機より伝導効率がよい (地表動力の 3-4%)。構造上ワイヤライン法は使えないが, 1 000 m ぐらいの長尺フレキシブルパイプを用い V を 3 000 m/h にした例はある。装置が大規模なので氷に使われたことはない。

3.5. 電熱ドリル

電熱ドリルは下方より, ヒーター, コアバレル, 水タンク, 制御部の 4 部で構成され, 切削面まで伸びた吸水管と開放タンクの間にはポンプをおく A 型と, 吸水管につながるタンクの上にポンプをおく B 型とがある。ポンプは A 型では液ポンプ, B 型では乾孔用は排気ポンプ, 液封孔用は液ポンプを用いる。乾孔では, コアバレル長は大気圧で制限され, 高地での使用では A 型で約 5 m, B 型では約 3 m 以下にとる。

上記のような水タンクを備えた電熱ドリルは, 1960年にクレルが 3 000 m 級の南極氷床の全層掘削をめざして, 3 600 m の電力ケーブルをもつウインチ (最高巻上速 3 000 m/h) とともに導入したものが最初であろう。これは A 型で, 自重 400 kg, 全長 9 m, コア採取長 3 m で, ヒーターは外径 162 mm, 内径 124 mm, 高さ 50 mm の矩形断面のアルミ製リングに 18 本のカートリッジヒーターを挿入したもので, 定格は 11 kW である。このドリルはグリーンランドで1960年以来試用され, 1963年に 264 m, 翌1964年には, 液封されたこの孔をさらに 534 m まで掘ったが, 以後は液封孔内での使用は中止された (UEDA and GARFIELD, 1968)。

進入速度が予定を大幅に下回ったことが中止の原因と思われる（ヒーターの定格値から、10 m/h の進入速度を予定したと思われるが、2-3 kW 以上に電力をあげても、切削面積が広がるだけで、進入速度は 3 m/h 以下だったと思われる）。

このドリルを、コア採取長 2 m と小型化し乾孔用 B 型配置としたものが、1960年にカナダの求めに応じて作られ、1965年には 450 m ケーブル（外径 12 mm, 比重量 0.6 kg/m）を巻いた最高速 1 200 m/h のウインチに 5 kW の発電機を組み合わせで発表された (UEDA and GARFIELD, 1969b)。機材全重量は 1.2 t で、前記の 450 m ロータリー機の 26 t の 20分の 1 以下である。このドリルは、改良を加えながら現在まで多数作られ、各国で使用されている（最新型については、RAND, 1980b を参照）。日本観測隊のみずほ基地でのボーリングに用いられたものも同型であるが、ヒーターについては外径はクレルと同じだが、シースヒーターをアルミに鋳込んだものを用いた (SUZUKI, 1976)。オーストラリアも鋳込みヒーターを用いている (BIRD, 1976)。

垂直断面が矩形で、底面付近だけが融水に接するアルミ製ヒーターでは、出力密度の上限は $5 \times 10^5 \text{ W/m}^2$ ぐらいで、これ以上ではアルミが溶ける。フランスでは、らせんに巻いた裸抵抗線を環形にし、全体を融水につけることで出力密度を高め、7.2 m/h の掘進速度を得た。このドリルは、変圧器をもち、送電を高電圧で行うのも特徴である。コア採取長は 2 m である (GILLET *et al.*, 1976)。このドリルで 1976-77年に 905 m まで乾孔掘削したが、以深の液封掘削のため、ポンプを液ポンプに変え、コア採取長を 6-8 m と大型化する計画という (DONNOU *et al.*, 1982)。

掘進速度をフランス型以上にあげるには、ヒーターで熱した熱媒体を切削面に吹き付ける方法が必要と思われる。この点を多少とも考慮したといえるのは、ソ連の水溶性液封孔用の水タンクのないドリルである。このドリルは複管で内管内にはピストンがあり、最初はピストンは内管下端にあり上部には適当な濃度のアルコール水溶液を入れておく。掘削時、ピストンはコアで押し上げられ、アルコール水溶液は内管上部から出て内外管の間を下りヒーターで暖められて融水と混じる。このドリルは 1977年ロス棚氷で 414 m を 12 日間で掘った (ZOTIKOV, 1979)。

フィルンや温暖氷河では、融水を孔外に排出する必要はない。このための水タンクのない電熱ドリルは古くからある (SHREVE and KAMB, 1964; TAYLOR, 1976)。全断面ボーリング用では、ヒーターを砲弾形とする（最適形を求める試みは、HOOKE, 1976）。

水試料採取を目的とした、水タンク付きの全断面電熱ドリルも作られた (GILLET *et al.*, 1982)。電熱ドリルは進入速度が遅く、効率も電気ドリルより悪いが、動作が安定し取り扱いやすいので、今後も機材重量と掘削時間に余裕のある時は使われるであろう。

3.6. 電気ドリル（液封孔用）

地盤掘削用は、送電線付きドリルパイプ列でつるし掘削流体で切粉を連続処理する方式、および電力ケーブルでつるし切りくずをドリル内に收容する方式が実用化されているが、氷では後者のコアドリルだけが使われている。最初に用いたのは、液封孔内での電熱ドリルの使用をあきらめた CRREL である。CRREL は地盤用のものをほとんどそのまま用いた。その構造は制御部から順に、切粉收容タンク、水中モーター、ポンプ、減速機、複管型コアドリル（切削具付きの外管回転）である。タンク内の掘削流体は、水中モーターのまわりを下ってポンプに入り、中空シャフトからコアドリル内外管の間を通して孔底に噴き出し、切粉をのせてドリルと孔壁の間を上昇、開口部よりタンクにもどり、ここで切粉を沈殿させ、再びポンプに向かう仕組みであるが、CRREL は泥水に代えエチレングリコール水溶液をタンクに入れた。モーターで暖められたこの液は、切粉を溶かし、タンクにはうすめられてもどる。一回の掘削終了時にタンクに回収しきれない残液は孔内に放置した（もとの封液はトリクロロエチレンと軽油との混合物で、エチレングリコール水溶液より軽い）。刃は前述のロータリー機に似たもので効率は悪い。バレル長 6 m, 全長 25 m, 自重 1.2 t, モーター定格出力 17.5 hp (13 kW), 孔径 162 mm, コア径 108 mm である。実際の使用では入力 7.5–9.0 kW で、進入速度は 10 m/h であった。このドリルを用い、CRREL は1966年グリーンランドで 1 387 m で氷床底に達し (UEDA and GARFIELD, 1968), ついですべての器材を南極バード基地に運び、1966–67年に最初の 88 m を電熱ドリルで掘削し、ケーシング液封の後、再びこのドリルにより 227 m まで掘削、1967年11月1日に掘削を再開し1968年1月29日に 2 146 m の氷床底に達した (UEDA and GARFIELD, 1969a).

このドリルは、氷掘削用としてはきわめて効率が悪く、上記データから計算されるドリルの E_s 値 ((2) 式で P をドリル入力とする) は 2×10^8 Pa に達する。大部分のエネルギーは、ポンプ動力となり、最終的には熱エネルギーとなり、一部は切粉の溶解に用いられたが、大部分は散逸したものである。

液封孔内用電気ドリルで氷専用開発されたのは、1976年に発表されたデンマークのものが有名である。このドリルは、氷用平刃をもつ単管ドリルで、外側に下端が刃先までのび上端はバレル上部につながる吸水管がつき、巧妙な仕かけにより、バレル内のピストンがバレルの回転に応じて下方に移動し、切粉と液の混じったスラリーをバレル上部に吸引するようになっている（3枚の平刃のそれぞれに対し、吸水管、ピストン、収納部がある）。孔径 129.5 mm, コア径 102.3 mm で、コア採取長は 2.2 m, ドリル自重 180 kg, 全長は 11.5 m である。モーターは直流モーターで、入力定格は 48.5 V, 12A である。試作機は内臓バッテリーで駆動し、つり下げは鋼線ワイヤーによった (RAND, 1980a) が、実用機はバッテリーをバッファとし、常時電力ケーブルを通じて充電する方法をとった。

充電電流は 1A 以下で 2 500 m 用ウインチに用いたケーブルは外径 6.54 mm, 比重量 0.153 kg/m にすぎない。油圧駆動で 1 m/s の最高速を出せるこのウインチは、ケーブル、マストを加えて重量は 900 kg である (CRREL の大型電気ドリル用のケーブルは外径 25.4 mm, 比重量 2.1 kg/m, ウインチ重量は 18 000 kg)。試作機は 1979 年グリーンランドで、表層を電熱ドリルで掘削しケーシングした (RAND, 1980b) 液封孔内を 225 m まで掘り、実用機は翌 1980 年に 901 m, 1981 年には氷床底と思われる 2 037.63 m に達した。ここでドリルは抑留されたが、1982 年に回収された。ドリルの E_s 値 (式 (2) で P をドリル入力とする) は、掘削深が増すにつれてわずかに増加したが、2 000 m 附近でも 16×10^6 Pa で、前出の大型電気ドリルに比べはるかに高効率である (GUNDSTRUP and JOHNSEN, 1982)。

高効率は氷に適した刃の採用のほか、切粉回収のエネルギーの節減によることが大きい。液封孔内での切粉回収は、常に液の移動を伴う。この時、切粉を含んだスラリーに十分な上昇速度を与え、さらに地盤ボーリングでは刃の冷却を十分に行えるだけの流量が必要である。氷の場合は刃の冷却は不要である。また、流路をドリル外を下降し孔底より吸液管をへてタンクに帰る逆路をとれば、吸液管の断面積を小さくして、小流量で十分なスラリー速度が得られる。デンマークドリルは、この逆循環の採用により流量を減じ、循環に要するエネルギーを節減した。

同様な考えでフランスは、前記地盤ドリルと似た構成で (ただしタンクをモーターの下部におく)、複管式に代えて吸水管付の単管コアバレルを用い、液ポンプにより流体を逆循環させる方法のドリルを試作した。しかし、タンク内で切粉を分離するには、タンクを回転させる遠心分離法を用いたので、そのためのエネルギー消費がかなり大きい (DONNOU *et al.*, 1982)。

筆者は、後述の乾孔用複管オーガー方式をそのままアルキメデスポンプとして用いるのが最もエネルギーが少なくすむと考え、現在この形式のものを開発中である。

ソ連は現在ボストークで 2 000 m を超えて電気ドリルによる掘削が続けているが詳細は不明である。

3.7. 電気ドリル (乾孔用)

最も簡単な発想は、減速機付きモーターに SIPRE オーガーをつけ、ケーブルでつるす方法で、筆者も 1973 年にこの形式のものを作った (SUZUKI, 1976)。この方式はドリルの反力防止の点で問題がある。前節で説明すべきであったが、電気ドリルでは、掘進時のトルクの反力により逆回転させられるのを防止する必要がある。単管、もしくは外管の回転する型式では、ドリルのうけるトルクは、孔底よりうけるトルク (切削トルク) T_1 と、孔壁よりうけるトルク T_2 の和である。液封孔用ドリルでは、孔壁とバレル間は常に液体であるので、 T_2 はあまり大きくない。しかし、SIPRE オーガーでは孔壁とバレル間は切粉で埋まっており、

時にこの切粉が圧縮され、 T_2 が異常に大きくなるので、反力装置の設計が難しい。この難点は、バレルをモーター部に固定したジャケットでおおうことで克服される。これにより、孔壁とバレル間のトルク交換は、バレル露出部に限られ、 T_2 は著しく減少し、ドリル反力装置では T_1 だけを考えればよくなった。ジャケットはまた、切粉通路の壁面状態を一定とするので、切粉上昇を安定化し、必要エネルギーを減少させる。このようなジャケット付きドリルは、1970年代初期に、アイスランド (ARNASON *et al.*, 1974; THEODORSSON, 1976)、スイス (RUFLI *et al.*, 1976)、CRREL (RAND, 1976) などで作られた。このうち、アイスランドのものは、オーガーバレルと減速機を長いシャフトで結び、この部分のジャケット内部を切粉収容部とした S 型 (separate type) で、ほかはコアバレル上部を切粉収容部とする U 型 (unit type) である。現在、U 型が主流であるが、湿り氷用、さらには液封孔用には S 型が適していると思われる。反力防止装置は、スキーもしくはスケート状の圧着板で、バネ作用により孔壁を押す方式が一般であるが、筆者は、孔壁に溝をきる方法を用いている (SUZUKI, 1982; SUZUKI and SHIRAISHI, 1982)。

後者の方が確実であるが、最近ではドリルの改良が進み T_1 が減少してきた (孔径 100 mm で 10 Nm 以下) ので、前者の方式でも十分かもしれない。

初期の頃は、切粉輸送が困難であり、コア採取長は 1 m 以下で、所要エネルギーも多かったが、最近では 2 m 以上のコアも採取できる。筆者らは、実験室内で、2 m コア採取ドリルで、ドリル E_s 値 8×10^6 Pa を得た (入力 400 W, 孔径 133 mm, コア径 107 mm, 進入速度 10^{-2} m/s) (SUZUKI and SHIMBORI, 1984)。

電気ドリルは、電熱ドリルの10分の1の入力で10倍の進入速度が得られる。採取コア長が短いので、100–200 m の掘削に用いられてきたが、コア長 2 m 以上が可能となったので、今後はあらゆる深さで、電熱ドリルに代わってゆくものと思われる。

3.8. スチームドリル

蒸気をノズルより噴出し、氷を融解するドリルで、融水は処理せず、まわりにしみこませるか、孔内に留める。ボイラー内臓ドリルも考えられるが、実用化されたものは、地上にボイラーをおき、剛体パイプにノズルをつけたドリルにホースで蒸気を送る方式である。蒸気の輸送は、発生蒸気圧により行うので、深い掘削、特に孔内に融水が残りノズルに背圧のかかる時は、必要蒸気圧が高くなる。

大型のものは、1960年にグリーンランドのセンチュリー基地で水源用氷中井戸の造成に使われた (氷中井戸は、不透水層まで縦孔を掘り、ここに熱源をいれ周囲の氷を溶かし、造水および貯水を行うもので、考案者に因んで RODRIGUEZ 井戸とよばれる)。ボイラーは 1.14 MPa (11.23 気圧) の 191°C の過熱蒸気を毎時 360 kg 発生した (熱出力約 280 kW)。縦孔の深さは 50 m である。造水装置は揚水用水中ポンプと一体だが熱源は同じボイラーを用い

た。井戸は使用するにつれて深さを増し、150 m まで使用した (CLARK, 1965)。これは、上記の蒸気圧で 150 m 程度は必要な熱輸送ができたことを示すと考えられるが、熱損失はかなり大きかったと思われる。最近では水中井戸の造成、維持には高圧ボイラーを必要とせず、また熱損失の少ない熱水ドリルが用いられる。

ごく小型のものには、HODGE の携帯型がある。これは、容量 6.9 l の煙管式ボイラーと重量 6.3 kg (プロパン 1.8 kg を含む) のプロパンポンペを 794×432×210 mm の容器にまとめたもので、水抜き重量は 26.9 kg である。使用蒸気圧は 0.3 MPa (2.96 気圧)、温度は 141°C であった。ホースは 1 本の長さ 8 m、外径 25.4 mm の外管ゴム、内管テフロン製の二重管で、ドリルは外径 25.4 mm、長さ 1.8 m、外管 FRP、内管テフロンで、ノズル径は 25.4 mm および 50.8 mm のものを用いた。小径ノズルでホース 1 本使用時に進入速度は 33 m/h、2 本使用時 15–25 m/h であった。ボイラーで雪を溶かし 6.9 l の水をつくるに 12 分、これを常用圧まで高めるには 12 分を要した (HODGE, 1971)。ボイラー出力は 3–4 kW と推定される。このドリルは小径 (30–60 mm) の浅孔 (10 m 以浅) を、一時に多数掘削するには適している。

3.9. 熱水ドリル

熱水はポンプで送水する。低圧ボイラーでよい、熱媒体温度が低いので熱損失が少ない、深い液封孔にも使用できるなど、スチームドリルに比べて利点が多い。1978–79年、氷厚 420 m のロス棚氷で、定格出力 2500 kW の大型ボイラーを用い、径 76 cm 以上の貫通孔 3 本をいずれも 10 時間以内で掘った。あらかじめ作った 51 m 深の水中井戸から、7.5 kW 水中ポンプで 2°C の水を毎分 300 l ボイラーに送り、98°C に熱したうえ、外径 5 cm、長さ 450 m のホースにより、長さ 3 m、外径 7.6 cm のドリルに導いた。掘削孔は水中井戸の横に広がった部分を貫通しているので、水は井戸と孔底の間を循環することになる。ホース内の温度降下は 100 m につき 3.3°C であったが、これは孔内の水の凍結防止に使われたので無駄ではない (BROWNING *et al.*, 1979; KOCI, 1982b)。

1979–80年、南極のドーム C では、送水量毎分 26 l の小型のものが用いられた。ボイラー出力は約 160 kW である。水はあらかじめ必要量を作り、容量 2000 l の水タンクにためた。孔径 7.6 cm 以上で 60 m 掘削には 1135 l の水を要し、掘削時間は 2 時間、水の準備をいれても 2.5 時間であった (KUIVINEN *et al.*, 1980; KOCI, 1982b)。

3.10. 火炎ドリル

燃料と酸化剤 (空気または酸素) を送り、孔底のドリル内で燃焼させ、高温の火炎を孔底に吹き付けるドリルでもともと岩盤用に開発された。ドリル冷却のための送水と合わせ、全部で 3 本のホースを用い、また液封孔内の使用では、それぞれに高圧ポンプが必要であるなど、熱水ドリルに比べ装置が大規模、複雑となる。1977年12月、ロス棚氷で 420 m の貫通孔 2 本を各 10 時間弱で掘ったが、機材重量は 20 t に達した。空気圧縮機は 2 台を直列に用い

8.3 MPa (82気圧) で用いた。進入速度は孔径 60 cm で 36 m/h, 30 cm で 110 m/h であった (BROWNING and SOMERVILLE, 1978)。出力は 1 000 kW 程度と推定される。1978-79年にも、やや小型のもので、径 33 cm の孔を 390 m 掘った (BROWNING *et al.*, 1979) が、それ以後は使われていない。

4. トンネル掘削

氷床内の水平トンネルの掘削は 1955-59 年、グリーンランド氷床縁で行われた。その総合報告 (ABEL, 1961) により、以下に概要を述べる。

1955年には、幅 1.65 m, 高さ 1.95 m のトンネル 150 m を主に人力により掘削した。まず、切羽下部に高さ、深さともに約 20 cm の三角形の溝を作り、ついで上部をつるはしで数回強打し、板状に破碎、破片はそりで排出する。破碎に 2 名、積み込みに 2 名、排出に 2 名で、1 日 (6.5 時間) 平均 3.6 m 掘進できた。下部の溝作りに、刃長 30 cm のチェーンソーを使うと労力は軽くなるが、掘進速度はほとんど変わらなかった。トンネルの長さが 100 m を超えると、2 台のそりでは排出が追いつかなくなった。孔口より 64 m 地点で、砂れきがコンクリート状に固まったモレーンバンドに遭遇した。厚さ 0.3-0.6 m だが、つるはしでは掘進できず、石のみとハンマーおよび発破を用いた (振動ハンマーは用意していなかった)。

1956年は、トンネルの拡張、延長、および 18×18×6 m の空間の掘削が行われた。トンネル掘削はほとんどつるはしとチェーンソーによったが、後者は刃長 90 cm のもので、これにより 1 回あたり 75 cm 掘進できた。切粉排出には、レールを敷きトロッコを用いた。空間は、主トンネルに直交する深さ 30 m のトンネルの末端に作られたが、まず 2×2×6 m の垂直孔を作り、この上部から幅 2.7 m 高さ 2.25 m のトンネルを「王の字形」に掘る。この床を 2.25 m と 1.5 m と 2 度掘り下げてトンネル高を 6 m にする。「王の字形」の横線間に残した厚さ 5 m 弱の壁には、1 m² あたり約 1 個の割で、径 4.5 cm の発破用孔を、片側より 2.4 m, 他の側より 1.2 m の深さにあける。天井の破壊を防ぎ、また壁を床面で完全に破壊するため、最下列の孔には他の 3 倍量の火薬をつめた。しかし天井のひび割れはさけられず、不安定な部分を落とすのに 32 人・時間を要した。

氷圧が増すと氷がより塑性的となり、つるはしによる破碎が困難となる。1956年のトンネル末端の氷圧は 4 MPa (氷厚 45 m) であったが、これ以上ではつるはしによる破碎は困難なので、1957年にはコールカッター (採炭機) を導入した。これは、ゴムタイヤ付き電動自走車につんだ刃長 2.7 m の大型チェーンソーで、高さ 2.25 m 内で任意方向に幅 15 cm の切り込みが行える。これで、既存トンネルを幅 3.6 m, 高さ 2.25 m に広げた上、130 m 延長し、このほかに、床面 9.6×30 m および 7.2×30 m の 2 つの空間を掘削した。掘削法は切羽面周囲にコールカッターで深さ 2.7 m の切り込みをいれ、中心の 5 cm 径、2.4 m 深の発破孔で爆破する。切り込みのため天井は安定である。切粉排出には、12 台のトロッコと 1 台の蓄電

池機関車を用いた。

1958年および59年には、新しいトンネルと居住および倉庫空間掘削を大容量の連続採炭機 (Joy Manufacturing Co. 製, 3 JCM-4 型) を用い掘削した。これは、先端に切削幅約 1 m の 5 本の平行チェーンソーをもち、これを上下、左右に振って、高さ 2.5 m, 幅 3.6 m の切羽面を作ることができる。切りくずは、らせんローラで集めコーベヤーで後部に運ぶ。これらの駆動および自走のため、出力合計 116 kW の 7 基のモーターを持ち、公称掘削能力は石炭に対し毎分 2 t である。切粉排出は、主トンネル内は 2.2 kW のベルトコンベアーと 360 m まで延長できるベルトコンベアー (モーター 3 基, 計 41 kW) を、また孔口よりボタ山頂上までは 11 kW のベルトコンベアーを用い、側道では、電池式運搬車 (13.5 kW) と積み込み機 (11 kW) を用いた。

1958年は、 5.4×4.5 m のトンネル 60 m, 5.4×2.25 m のトンネル 270 m, $380\text{--}1525$ m³ の 3 つの空間など計 9 300 m³ を、1959年は 5.4×2.25 m のトンネル 270 m と最大 2 000 m³ におよび 13 の空間など計 14 000 m³ を掘削した。電力消費率は、1958年は 3.7 kW h/m³, 1959年は 1.83 kW h/m³ であった。

5. トレンチの掘削

フィルム層にトレンチを掘り、屋根をかけて水中基地を作る技術は、1954-58 年にグリーンランドの Site 2 基地で試験され、1959-60年、センチュリー基地建設で大規模に使われた (BADER *et al.*, 1955; WATERHOUSE, 1960; CLARK, 1965)。

1954年には、1.2 m 幅、4.2 m 深の主トレンチ 33 m (うち 6 m は斜路) と、これに交わる同じ幅で 3.9 m 深、30 m 長および 1.8 m 深、14 m 長の 2 本の副トレンチ、そのほか、直径 2.1 m のトンネル 20 m, 1.8×1.8 m で深さ 30 m のピットなどを掘削した。トレンチ掘削では、まず雪面の標線沿いにチェーンソーで深さ 1.2 m の切り込みをいれた後、シャベルでフィルムをブロック状に切り出し、ウインチでひくそりに載せ、斜路より排出した。3 人で 8 時間の掘削量は上層 2.1 m で 20 m³, 下層では 10 m³ であった。30 m トレンチの下層からは、雪小屋建設のため、木型を用い定形のブロックをチェーンソーで切り出した。3 人で 8 時間の作業量は 5.7 m³ であった。ピットは、10 m 深まではチェーンソー、以深はつるはしを用い、切粉排出には、 $0.6 \times 0.6 \times 1.2$ m のスキー付きトロッコを使用し、やや傾けたピット壁面をウインチで引きあげた (BADER *et al.*, 1955)。10 m 以深でつるはしを用いたのは、チェーンソーより掘進速度が速かったためであろう。しかし、チェーンソーで周囲を母体から切り離したブロックは、切り目にくさびを打ち込むと容易に下端で破断するので、つるはしより労力は軽くてすむ。

1955年以後のトレンチ掘削は、ロータリー除雪機 (Peter snow miller) によった。75 kW エンジン 2 基、除雪幅 2.42 m, 最大除雪深 1.2 m, 排雪量は密度 400 kg/m³ の雪で、600 m³/h

のものである。1955-56年は、深さ 1.9 m, 幅 3.63 m のトレンチ中央部 2.42 m を掘り下げ、両肩間にアーチ形わくをかけ、その上を除雪機の排雪 (Peter snow と俗称) でおおい、焼結させて雪屋根とする試験が行われた。この方法で 4.8 m 幅までは雪屋根が実用できる (WATERHOUSE, 1960)。より幅広い空間が必要な時は、トレンチ下部のみ拡幅する手法が、1958年以降使われている (CLARK, 1965)。

現在、ロータリー除雪機は、国産でも各種市販されている。内陸基地建設において、ロータリー除雪機による開掘削方式 (cut- and cover-method) は検討に値すると思われる。

文 献

- ABEL, J. F., Jr. (1961): Under-ice mining techniques. CRREL Tech. Rep., 72, 76p.
- ARNASON, B., BJORNSSON, H. and THEODORSSON, P. (1974): Mechanical drill for deep coring in temperate ice. J. Glaciol., 13, 133-139.
- BADER, H., WATERHOUSE, R. W., LANDAUER, J. K., HANSEN, B. L., BENDER, A. and BUTKOVITCH, R. T. (1955): Excavation and installations at SIPRE test site, Site 2, Greenland. SIPRE Res. Rep., 20, 32p.
- BIRD, I. G. (1976): Thermal ice drilling; Australian developments and experience. Ice-Core Drilling, ed. by J. F. SPLETTSTOESSER. Lincoln, Univ. Nebraska Press, 1-18.
- BROWNING, J. A. and SOMERVILLE, D. A. (1978): Access hole drilling through the Ross Ice Shelf. Antarct. J. U. S., 13, 55.
- BROWNING, J. A., BIGL, R. A. and SOMERVILLE, D. A. (1979): Hot-water drilling and coring at Site J-9, Ross Ice Shelf. Antarct. J. U. S., 14, 60-61.
- CLARK, E. F. (1965): Camp Century; Evolution of concept and history of design, construction, and performance. CRREL Tech. Rep., 174, 66p.
- DONNOU, D., GILLET, F., MANOUVRIER, A., PERRIN, J., RADO, C. and RICOU, G. (1982): Deep core drilling; Electromechanical or thermal drill? Preprint of Ice Drilling Technology Workshop, Calgary.
- GILLET, F., DONNOU, D. and RICOU, G. (1976): A new electrothermal drill for coring in ice. Ice-Core Drilling, ed. by J. F. SPLETTSTOESSER. Lincoln, Univ. Nebraska Press, 19-27.
- GILLET, F., RADO, C., MAREC, G., MAITRE, M., PERRIN, J. and RICOU, G. (1982): "Climatopic" thermal probe. Preprint of Ice Drilling Technology Workshop, Calgary.
- GOW, A. J. (1963): Results of measurements in the 309 meter bore hole at Byrd Station, Antarctica. J. Glaciol., 4, 771-784.
- GUNDSTRUP, N. S. and JOHNSEN, S. J. (1982): Istuk—A deep ice core drill system. Preprint of Ice Drilling Technology Workshop, Calgary.
- HANSEN, B. L. (1976): Deep core drilling in the East Antarctic Ice Sheet: A prospectus. Ice-Core Drilling, ed. by J. F. SPLETTSTOESSER. Lincoln, Univ. Nebraska Press, 29-36.
- HANSEN, B. L. (1982): An overview of ice drilling technology. Preprint of Ice Drilling Technology Workshop, Calgary.
- HARRISON, W. D. and KAMB, B. (1976): Drilling to observe subglacial conditions and sliding motion. Ice-Core Drilling, ed. by J. F. SPLETTSTOESSER. Lincoln, Univ. Nebraska Press, 37-43.
- HODGE, S. M. (1971): A new version of a steam-operated ice drill. J. Glaciol., 10, 387-393.
- HOOKE, R. LEB. (1976): University of Minnesota ice drill. Ice-Core Drilling, ed. by J. F. SPLETTSTOESSER. Lincoln, Univ. Nebraska Press, 47-57.
- JOHNSEN, S. J., DANSGAARD, W., GUNDESTRUP, N., HANSEN, S. B., NIELSEN, J. O. and REEH, N. (1980): A fast light-weight core drill. J. Glaciol., 25, 169-174.
- KOCI, B. R. (1982a): A lightweight hand coring auger. Preprint of Ice Drilling Technology Workshop, Calgary.

- KOCI, B. R. (1982b): Hot water drilling in antarctic firn, and freezing rates in water-filled boreholes. Preprint of Ice Drilling Technology Workshop, Calgary.
- KUIVINEN, K. C., MARSHALL, P. S. and KOCI, B. R. (1980): Polar Ice Coring Office (PICO) drilling activities, 1979–80. *Antarct. J. U.S.*, **15**, 76–77.
- LANGE, G. R. (1973): Deep rotary core drilling in ice. *CRREL Tech. Rep.*, **94**, 44p.
- LITWAK, J., KERSTEN, L. and KUIVINEN, K. (1982): The PICO intermediate drill system. Preprint of Ice Drilling Technology Workshop, Calgary.
- MELLOR, M. and SELLMAN, P. V. (1976): General considerations for drill system design. *Ice-Core Drilling*, ed. by J. F. SPLETTSTOESSER. Lincoln, Univ. Nebraska Press, 77–111.
- RAGLE, R. H., BLAIR, R. C. and PERSSON, L. E. (1964): Ice core studies of Ward Hunt Ice Shelf, 1960. *J. Glaciol.*, **5**, 35–39.
- RAND, J. H. (1976): The USA CRREL shallow drill. *Ice-Core Drilling*, ed. by J. F. SPLETTSTOESSER. Lincoln, Univ. Nebraska Press, 133–137.
- RAND, J. H. (1977): Ross Ice Shelf Project drilling, October–December 1976. *Antarct. J. U. S.*, **12**, 150–152.
- RAND, J. H. (1980a): The Danish deep drill—Progress report: February–March 1979. *CRREL Spec. Rep.*, **80(3)**, 40p.
- RAND, J. H. (1980b): 1979 Greenland Ice Sheet Program. Phase 1: Casing operation. *CRREL Spec. Rep.*, **80(24)**, 18p.
- RUFLI, H., SAUFFER, B. and OESCHGER, H. (1976): Lightweight 50-m core drill for firn and ice. *Ice-Core Drilling*, ed. by J. F. SPLETTSTOESSER. Lincoln, Univ. Nebraska Press, 139–153.
- SHREVE, R. L. and KAMB, W. B. (1964): Portable thermal core drill for temperate glaciers. *J. Glaciol.*, **5**, 113–117.
- SUZUKI, Y. (1976): Deep core drilling by Japanese Antarctic Research Expeditions. *Ice-Core Drilling*, ed. by J. F. SPLETTSTOESSER. Lincoln, Univ. Nebraska Press, 155–166.
- SUZUKI, Y. (1982): Light electrodrills. Preprint of Ice Drilling Technology Workshop, Calgary.
- SUZUKI, Y. and SHIMBORI, K. (1984): Mechanical drill systems for the 25th Japanese Antarctic Research Expedition. *Mem. Natl Inst. Polar Res., Spec. Issue*, **34**, 188–196.
- SUZUKI, Y. and SHIRAIISHI, K. (1982): The drill system used by the 21st Japanese Antarctic Research Expedition and its later improvement. *Mem. Natl Inst. Polar Res., Spec. Issue*, **24**, 259–273.
- SUZUKI, Y. and TAKIZAWA, T. (1978): Outline of the drilling operation at Mizuho Station. *Mem. Natl Inst. Polar Res., Spec. Issue*, **10**, 1–24.
- TAYLOR, P. L. (1976): Solid-nose and coring thermal drills for temperate ice. *Ice-Core Drilling*, ed. by J. F. SPLETTSTOESSER. Lincoln, Univ. Nebraska Press, 167–177.
- THEODORSSON, P. (1976): Thermal and mechanical drilling in temperate ice in Icelandic glaciers. *Ice-Core Drilling*, ed. by J. F. SPLETTSTOESSER. Lincoln, Univ. Nebraska Press, 179–189.
- UEDA, H. T. and GARFIELD, D. E. (1968): Drilling through the Greenland Ice Sheet. *CRREL Spec. Rep.*, **231**, 7p.
- UEDA, H. T. and GARFIELD, D. E. (1969a): Core drilling through the Antarctic Ice Sheet. *CRREL Tech. Rep.*, **231**, 17p.
- UEDA, H. T. and GARFIELD, D. E. (1969b): The USA CRREL drill for thermal coring in ice. *J. Glaciol.*, **8**, 311–314.
- UEDA, H. T., SELLMAN, P. and ABELE, G. (1975): USA CRREL snow and ice testing equipment. *CRREL Spec. Rep.*, **146**, 14p.
- WATERHOUSE, R. W. (1960): Cut- and cover trenching in snow. *SIPRE Tech. Rep.*, **76**, 11p.
- ZOTIKOV, A. (1979): Antifreeze-thermodrilling for core through the central part of the Ross Ice Shelf (J-9 camp), Antarctica. *CRREL Rep.*, **79(24)**, 12p.

(1984年10月11日受理)